

# 提高广东架空送电线路输送容量研究

彭向阳<sup>1</sup>, 周华敏<sup>2</sup>, 郑晓光<sup>1</sup>, 程启诚<sup>2</sup>, 林声宏<sup>3</sup>

(1. 广东电力科学研究院, 广州 510600; 2. 广东电网公司, 广州 510600; 3. 华南理工大学, 广州 510640)

**摘要:** 阐述架空导线载流控制条件, 分析广东架空送电线路实际运行条件和广东地区多年实测气象参数, 制定广东架空线路正常运行允许电流  $I_0$ , 通过风险分析证实现有线路正常载流能力可安全地提高 7% 以上。在正常允许电流  $I_0$  的基础上, 挖掘运行线路跨越距离裕度, 提出架空线路在检修、应急两种特殊运行条件下的允许电流  $I_1$ 、 $I_2$  及其确定原则, 通过对实际线路开展测量和验算, 确认电网特殊情况下存在安全增容的可能性, 特定线路可以多输送容量 30%~50%。

**关键词:** 架空线路; 输送容量; 环境温度; 跨越距离; 正常允许电流; 特殊允许电流

## Study on Raising Transmission Capacity of Overhead Transmission Line in Guangdong Power Grid

PENG Xiangyang<sup>1</sup>, ZHOU Huamin<sup>2</sup>, ZHENG Xiaoguang<sup>1</sup>, CHEN Qicheng<sup>2</sup>, LIN Shenghong<sup>3</sup>

(1. Guangdong Electric Power Research Institute, Guangzhou 510600, China; 2. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China; 3. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The control condition of carrying capability of overhead transmission line is introduced, and a deep analysis is given on operation terms of transmission lines and weather parameters survey in decades in Guangdong, and allowable current  $I_0$  on transmission line under normal operation for Guangdong Power Grid is established. It is approved by risk analysis that the transmission capacity can be raised 7% safely. Based on the normal allowable current  $I_0$ , the paper studies the residual span distance of overhead transmission line, puts forward two allowable current  $I_1$ ,  $I_2$  under overhauling and emergency conditions respectively, and their setup principle. The possibility of raising line transmission capacity 30%~50% is confirmed by surveying and checking computation of several operating lines.

**Key words:** overhead transmission line; transmission capacity; environment temperature; span distance; allowable current of natural operation; allowable current of special operation

目前广东电网线路输送容量限值是基于最恶劣气象条件为维持线路对地安全距离和导线最大工作温度得出的, 线路载流运行控制标准偏于保守, 线路输电能力没有得到充分利用, 实际上绝大多数情况下可以输送更多容量<sup>[1-2]</sup>。

本文分析输电线路载流控制因素和广东地区运行条件, 挖掘广东线路电能输送潜力, 在保证安全的前提下, 通过制定适合广东地区架空线路正常增容运行和特殊增容运行允许电流, 来提高广东输电线路输送容量, 最大限度提高输电设备利用率<sup>[3-5]</sup>。

## 1 导线载流控制条件

### 1.1 导线运行温度的规定

验算允许载流量时导线允许温度钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线可采用+70℃, 大跨越则可以采用+90℃<sup>[6]</sup>。正常运行条件下架空导线温度限制, 主

要是考虑发热对导线自身机械强度和对导线连接处过热两个因素的影响。

### 1.2 导线发热对机械强度的影响

我国和国外都已做了大量的研究工作, 前苏联和其他国家在 1980 年国际大电网会议上提交的报告证明, 钢芯铝绞线在通流发热到 150℃, 其机械强度不会下降, 有时还会略略上升。导线受热后强度升高的反常现象, 原因是加工后各股线残余张力不均匀, 承受试验拉力时, 各股破断先后不齐, 以致整体破坏强度偏低。强载流发热后, 股线的热伸长平衡了各股线残余应力, 各股受力趋于均匀, 提高了整体破坏强度。所以导线发热后强度提高是绞股工艺不良造成偶然现象。

关于发热温度对机械强度影响问题, 结论是载流发热直到 150℃钢芯铝绞线机械强度不会发生有害变化, 所以不少国家规定钢芯铝绞线正常条件允

许运行温度都高于 70℃。

### 1.3 导线发热对连接处的影响

我国规定钢芯铝绞线运行允许温度 70℃,另一个理由是防止连接金具过热。特别是截面 240 mm<sup>2</sup> 及以下导线使用螺栓式耐张线夹、跳线使用螺栓式并沟线夹时,导线过热会发生螺栓松动,使连接处接触不良而发热。而在广东电网,自 20 世纪 80 年代中期以后 110~220 kV 送电线路采用截面 240 mm<sup>2</sup> 导线已经不多,即便采用 240 mm<sup>2</sup> 导线,连接金具亦为压接型。

运行经验表明,连接通流金具缺陷,会在投运带负荷的早期暴露。如 220 kV 沙板线投运 3 个月就发生耐张杆塔跳线连接板运行中脱落事故,原因是压接时导线清洁不好,压接管内带泥,接触不良导致发热松脱;又如 220 kV 江开线也是投运不久发生断线事故,原因是导线压接管严重偏离中心位置,其中一侧导线只压接了 50 mm 长度。

经过较长时间运行的线路,即使导线过载甚至继电保护或开关拒动,经受较长时间短路电流冲击,正常连接金具一般不会发生通流事故。如 1990 年广东电网发生大面积停电事故,220 kV 芳顺线雷击接地事故,越级到黄埔电厂机组跳闸,短路电流穿越多回 220 kV 线路十几秒连接金具都没出现问题;又如 220 kV 沙公线出线 GIS 快速接地开关曾发生误动、三相接地,对侧 220 kV 公明站不能及时跳闸,短路历时近 20 s,导线过热后发生塑性伸长(弧垂不能恢复正常),亦未发现该线连接金具发生问题。

2006 年广东电科院对各种型号导线作室内通流发热试验,所有试样的线夹、压接管,甚至电流馈线的连接板,在各种电流下金具发热温度都低于邻近导线本体的发热温度。可见,导线载流发热对连接金具的影响,不再是制约导线运行温度的因素。具体请参见文献[7]。

## 2 架空线路正常运行允许电流

### 2.1 正常允许电流 $I_0$ 的定义

广东架空输电导线的正常运行允许电流  $I_0$ ,是针对某种型号导线制定的长期持续运行的允许电流值。广东电网需要一个不受季节、时间和天气等环境条件限制,也不需考虑架空送电线路结构状态,能保证运行安全的导线允许电流值。正常允许电流只与导线型号有关,是一个全天候的导线允许电流值。

### 2.2 正常允许电流 $I_0$ 的制定和风险评估

#### 2.2.1 导线运行允许温度

确定导线允许载流量首先要考虑导线允许温度。分析表明,钢芯铝绞线运行温度 70℃的安全裕度是很大的,但钢芯铝绞线长期在较高温度下运行也是不合理的。1956 年颁布的导线使用经济电流密度(见表 1)可作为铝导线选择和运行使用的原则。

以 LGJ-240/40 导线为例,根据文献[8],在设计规定的条件(正午、无云、风速 0.5 m/s)下,环温 40℃时,导线运行温度 70℃时的最小电流都有 470 A。LGJ-240/40 导线铝截面 238.85 mm<sup>2</sup>,电流密度已达 1.97 A/mm<sup>2</sup>,超过国家规定的年最大负荷小时数 3 000 h 的经济电流密度 1.65 A/mm<sup>2</sup>。

广东负荷峰谷差较小,线路年最大负荷小时数都比较高,如果导线温度长期接近 70℃,长期超经济电流密度,在经济上是不合理的。所以,尽管导线温度 70℃有很大的安全裕度,但考虑到电网长期经济效益,还是按照导线运行温度 70℃来制定广东电网正常运行允许电流  $I_0$  值。

表 1 导线经济电流密度

Tab.1 Economy Current Density of Line

线路最大负荷利用小时/h	铝导线经济电流密度/(A·mm <sup>-2</sup> )
≤3 000	1.65
3 000~5 000	1.15
≥5 000	0.9

#### 2.2.2 计算正常允许电流的季节、时间和天气

计算太阳辐射功率密度取 0.1 W/cm<sup>2</sup>,对广东省相当夏日晴天无云的中午 12 时,位处北回归线北纬 23.5°架空导线所受太阳辐射功率密度。该值是地球表面上日照强度最大值,属于极端情况,出现的几率很低,用来计算  $I_0$  是安全的,在大多数运行时间,导线实际温度或线行下跨越限距都隐含着安全裕度。

#### 2.2.3 计算风速

风速采用 0.5 m/s(大跨越采用 0.6 m/s),相当于蒲福氏 1 级风的下限,风标不动作,仅轻烟可示风向。电压 35 kV 及以上架空导线平均对地高度大于 10 m,在空中或旷野,风速这样低的概率很低。在冬季只发生在霜冻的夜间,在夏季只在风雨来临前短暂出现。前者当然不怕导线过热,后者则往往伴随强烈的大气垂直对流发生,对空中导线的冷却也是等价的。

室内试验发现,在水平无风情况下,当导线和

大气温差大于 20 °C 时,发热导线自身也产生对流散热的垂直气流。所以,使用 0.5 m/s 风速计算正常允许电流  $I_0$  也不会存在风险。

### 2.2.4 环境温度

环境温度应采用最高气温月的最高平均气温。根据 1971 年到 2006 年广东平均气温资料可得,最高平均气温值为 29.9 °C。采用 29.9 °C 计算广东架空线路正常运行条件下允许载流  $I_0$  值,风险评估如下:

首先确定极端环温。根据设计规程,典型气象区的最高环境气温取 40 °C;其次根据广东气象局 1959 年到 2007 年每年 7 月日最高温度记录:49 年日最高温度平均值为 37.2 °C,气温高于 38 °C 只有 13 天,最高气温 41.0 °C(2003 年 7 月 23 日)。可见以 40 °C 作为广东架空线路运行极端环温符合实际。

其次,导线对地面及各种交叉跨越距离,要求根据最高气温 40 °C 或覆冰无风下最大弧垂计算。选取 LGJ-240/40、LGJ-300/50、LGJ-400/50 和 LGJ-630/55 等 4 种导线,计算在 40 °C 下带电流  $I_0$  的弧垂,并和它们在导线温度 70 °C 的弧垂比较。验算按正常档(规律档距  $l_{re}=260$  m、档距  $l_n=300$  m)和大跨越档( $l_{re}=600$  m、 $l_n=800$  m),以及珠三角地区和粤北山区两种气象条件(表 2)等 4 种运行条件组合进行(表 3)。

表 2 验算导线弧垂变化的气象条件

气象参数	运行条件组合	
	珠三角	粤北山区
最大风速/(m·s <sup>-1</sup> )	35	30
最大风速时气温/°C	20	20
最低气温/°C	0	-5
最低气温时风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0	0
最高气温/°C	40	40
最高气温时风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0	0
最重覆冰厚度/mm	0	15
最重覆冰时风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0	10
最重覆冰时气温/°C	0	-5
年平均运行气温/°C	20	20
年平均运行张力/%	25	25

验算说明,当导线流过正常允许电流  $I_0$  又遇到 6 种极端运行条件(夏日正午无云、微风、气温 40 °C)的罕有组合下,正常档弧垂比线温 70 °C 弧垂下降不到 0.5 m,大跨越档弧垂最大下降 0.7 m。这就是说,只要线路跨越距离满足规程要求(一般大于 4 m),则使用最高气温月的最高平均气温 29.9 °C 计算广东架空线路正常运行允许电流  $I_0$  是安全的。

表 3 环温 40 °C 载流  $I_0$  弧垂对线温 70 °C 弧垂增量  
Tab.3 Sag Increment with Environment Temperature 40 °C of Carrying  $I_0$  to Conductor Temperature 70 °C

运行条件组合		导线温度/°C	比线温 70 °C 的弧垂增量/m
档距	气象条件		
正常档 $l_{re}=260$ m; $l_n=300$ m	珠三角地区	80.5~80.8	0.46~0.49
	粤北山区	80.5~80.8	0.42~0.46
大跨越档 $l_{re}=600$ m; $l_n=800$ m	珠三角地区	77.9	0.50~0.70
	粤北山区	77.9	0.49~0.60

## 2.3 正常允许电流 $I_0$ 及使用条件

按照上述原则完成了广东 140 种常用规格导线正常允许电流  $I_0$  的制定<sup>[9]</sup>,  $I_0$  只与导线型号有关,在保证安全和经济合理的前提下,给广东架空线路一个全天候的允许电流值,表 4 给出常用导线  $I_0$  值。以往一般以导线在气温 35 °C 的允许电流  $I_{35}$  作为运行限值,而本文制定的  $I_0$  比目前运行电流限值增大 7% 以上。

表 4 常用导线  $I_0$  及其较  $I_{35}$  的增容幅度

Tab.4 Raising Capability Extent of Line  $I_0$  to  $I_{35}$

导线型号	正常允许电流/A		增容幅度 $\Delta I_0/\%$
	$I_0$ (按 29.9 °C)	$I_{35}$ (按 35 °C)	
LGJ-240/40	557.7	520	7.25
LGJ-300/50	644.2	595	8.27
LGJ-400/50	768.7	710	8.27
LGJ-630/55	1 026.8	940	9.23

使用  $I_0$  的必要条件是,电网运行架空线路必须符合设计、运行规程技术要求,具体说就是所有线路跨越限距不应低于规程要求。

20 世纪 80 年代,广东架空送电线路较普遍存在跨越距离不足问题。经过多年技术改造,这些缺陷已基本消除,近 10 年建设的架空线路安全裕度都较大,可以说广东电网已经有条件采用正常允许电流  $I_0$  值。

为确保安全,在颁布实施  $I_0$  值之前,各运行单位应完成 35 kV 及以上架空线路跨越距离的核实整改,并列入常规工作。具体要求:对实测限距高出规程要求 30% 的可认为合格,否则应采用载流增容计算软件<sup>[9]</sup>,将实测跨越距离数值折算为标准气象条件下的跨越限距值,再判断是否满足要求。

## 3 架空线路特殊运行允许电流

### 3.1 检修允许电流 $I_1$

电网运行在“N-1”情况下时,为维持原有送电

能力,其他线路以 1.1~1.2 倍  $I_0$  运行,即检修允许电流  $I_1$ 。经过核定的某具体线路检修允许电流  $I_1$ ,在调度和运行单位特殊监视下允许运行一周到几个月。

### 3.2 应急允许电流 $I_2$

为处理电网突发事件,调度部门需要某些线路在一段时间内以 1.3~1.4 倍  $I_0$  运行,称为应急允许电流  $I_2$ 。经过核定的  $I_2$ ,在调度和运行单位特殊监视下,允许运行几小时到几天。

### 3.3 制定特殊允许电流可行性

#### 3.3.1 导线运行温度裕度

如前所述,直至 150 °C 常规钢芯铝绞线机械强度仍未减弱,所以对于非长期运行的特殊允许电流  $I_1$ 、 $I_2$  有足够的运行温度安全裕度。导线载流  $I_1$  最高运行温度预计可达 100 °C,载流  $I_2$  最高运行温度预计可达 120 °C。

#### 3.3.2 导线跨越距离裕度

规程要求的架空导线跨越距离值,还容许因负荷电流和太阳辐射而降低,但应校验最高允许温度时跨越距离不得小于操作过电压间隙且不少于 0.8 m<sup>[6]</sup>,可见对于线路短时特殊运行,跨越距离尚有裕度。

#### 3.3.3 使用特殊允许电流的最小跨越距离

特殊允许电流虽不是长期运行电流,但也是持续运行电流。尤其是检修允许电流  $I_1$  可能持续一两个月。可能遇到的不只是操作过电压,也可能遇到雷电过电压。所以跨越距离要比规程最低限值提高一个等级,即提高到耐受雷电过电压的间隙距离(表 5)。

表 5 特殊运行状态下导线最小跨越距离

运行允许电流	制定原则 (最高气温 40 °C 下不小于)	最小跨越距离/m		
		110 kV	220 kV	500 kV
正常 $I_0$	雷电过电压间隙+1.0 m	2.0	2.9	4.3
检修 $I_1$	雷电过电压间隙+0.5 m	1.5	2.4	3.8
应急 $I_2$	雷电过电压间隙	1.0	1.9	3.3

### 3.4 使用特殊允许电流风险评估

同样选取 LGJ-240/40、LGJ-300/50、LGJ-400/50 和 LGJ-630/55 等 4 种导线,按照 4 种档距及气象条件组合,计算了在最高气温 40 °C 下,分别带检修允许电流  $I_1$  (1.2 $I_0$ )、应急允许电流  $I_2$  (1.4 $I_0$ ) 的弧垂,对线温 70 °C 时弧垂的增量(见表 6、表 7)。

计算表明,对于检修允许电流  $I_1$  (1.2 $I_0$ ),只有 110 kV 线路(要求最小跨越距离  $\geq 1.5$  m)和正常档 220 kV 线路(要求最小跨越距离  $\geq 2.4$  m)才能大致

满足安全跨越距离要求;而对于应急允许电流  $I_2$  (1.4 $I_0$ ),只有正常档 110 kV 送电线(要求最小跨越距离  $\geq 1.0$  m)才勉强满足安全跨越距离要求。

表 6 环温 40 °C 载流  $I_1$  弧垂对线温 70 °C 弧垂增量

Tab.6 Sag Increment with Environment Temperature 40 °C of Carrying  $I_1$  to Conductor Temperature 70 °C

运行条件组合		导线温度/°C	比线温 70 °C 的弧垂增量/m
档距	气象条件		
正常档 $l_{re}=260$ m $l_n=300$ m 风速 0.5 m/s	珠三角地区 粤北山区	93.2~97.7	1.06~1.18 0.99~1.08
大跨越档 $l_{re}=600$ m $l_n=800$ m 风速 0.6 m/s	珠三角地区 粤北山区		89.6~93.4

表 7 环温 40 °C 载流  $I_2$  弧垂对线温 70 °C 弧垂增量

Tab.7 Sag Increment with Environment Temperature 40 °C of Carrying  $I_2$  to Conductor Temperature 70 °C

运行条件组合		导线温度/°C	比线温 70 °C 的弧垂增量/m
档距	气象条件		
正常档 $l_{re}=260$ m; $l_n=300$ m 风速 0.5 m/s	珠三角地区 粤北山区	110.4~113.0	1.75~1.85 1.54~1.71
大跨越档 $l_{re}=600$ m; $l_n=800$ m 风速 0.6 m/s	珠三角地区 粤北山区		105.7~107.9

### 3.5 特殊允许电流的确定

如前分析,特殊允许电流  $I_1$ 、 $I_2$  并不同于正常允许电流  $I_0$ ,不能无条件全天候适用,必须根据特定送电线路的具体情况确定。一般而言,送电线路跨越距离都有裕度,大跨越档的裕度往往更大。因此,对于实际线路制定特殊允许电流  $I_1$ 、 $I_2$  是可能的。确定特殊允许电流的步骤如下:

#### 3.5.1 选定线路关键跨越

选定线路运行中必须保证一定安全距离的跨越点,以校核跨越限距,如大跨越档(平地档距  $l_i \geq 400$  m,跨山谷档距  $l_i \geq 500$  m),即使没有被跨越物,亦须核实导线对地距离,对山地大跨越还需核实其近山边相导线对陡坡距离。实际操作中对跨越裕度明显的跨越,不需要验算核实。

#### 3.5.2 现场测量关键跨越

测量项目包括跨越档距  $l_i$ 、被跨越物水平距离  $l_K$ 、悬点高差  $\Delta h_i$ 、低侧悬点高  $h_D$  及被跨越物高  $h_K$  (可测量对某高程相对值)、导线弧垂  $f_i$ 、导线对跨越物或对地距离  $\delta h_i$  等。同时应记录测量时刻、导线

电流、导线温度  $t_m$ 、气温  $\theta_a$ 、天气状况(晴/阴)、风速  $V$  等参数。

受观测条件限制,无法在关键跨越点同时测量弧垂和跨越距离时,可选同一耐张段邻档测量弧垂  $f$  或跨距  $\delta h$ ,以计算即时导线应力。

### 3.5.3 特殊允许电流验算

利用载流增容计算软件<sup>[9]</sup>,验算在极端运行条件(气温 40 °C、夏至正午、晴天无云、风速 0.5~0.6 m/s)下运行线路导线的温度。以线路实测力学参数作为起始状态计算其跨越距离,如果全线所有关键跨越都满足特殊运行状态的最小跨越距离要求,则该线路适用特殊允许电流( $I_1$ 及 $I_2$ ,或只是 $I_1$ )。

选定东莞三回运行线路进行实际测量和增容验算<sup>[9]</sup>,确认三回线路架空部分均能通过特殊允许电流 $I_1$ 、 $I_2$ (表8),比目前的电流限额多输送 30%~50%的检修、应急负荷。这说明利用运行线路的跨越距离裕度,在电网特殊情况下可以提高线路输送能力。

表8 试验线路  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  及增容幅度  
Tab.8 Allowable Current  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  and Its Raising Capability Extent of Test Lines

线路名称	导线规格	$I_{35}/A$	$I_0/A$	$I_1/A$	$I_2/A$
220 kV 莞城甲线	LGJ-630/45	930	1 010.2	1 212.2	1 414.2
110 kV 下畔甲线	LGJX-400/50	710	768.7	922.4	1 076.1
110 kV 北南甲线	LGJX-300/40	595	646.5	775.8	905.1
线路名称	导线规格	$\Delta I_0/\%$	$\Delta I_1/\%$	$\Delta I_2/\%$	
220 kV 莞城甲线	LGJ-630/45	8.6	30.3	52.1	
110 kV 下畔甲线	LGJX-400/50	8.3	29.9	51.6	
110 kV 北南甲线	LGJX-300/40	8.7	30.4	52.1	

## 4 结 语

基于广东线路运行条件和多年实测气象数据,制定适合广东架空线路正常运行条件的允许电流 $I_0$ ,证实现有架空线路正常载流能力可安全地提高7%以上。通过严格的风险分析,论证广东架空线路以 $I_0$ 长期运行是安全的,不受线路具体结构限制,同时满足规程要求。

在 $I_0$ 基础上,挖掘运行线路跨越距离裕度,提出架空线路在检修、应急两种特殊运行条件下的允许电流 $I_1$ 、 $I_2$ 及其确定原则,通过对实际线路特殊允许电流 $I_1$ 、 $I_2$ 的工程验算,确认在电网特殊情况

下,特定线路可多输送 30%~50%的检修、应急负荷,实现架空送电线路安全增容运行。

### 参考文献:

- [1] 尤传永, 增容导线在架空输电线路上的应用研究[J]. 电力设备, 2006, 7(10): 1-7.  
YOU Chuanyong. Application and Research of Augmented Capacity Conductor on Overhead Power Transmission lines[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(10): 1-7.
- [2] 叶鸿声, 龚大卫, 黄伟中. 提高导线允许温度增加线路输送容量的研究及在 500 kV 线路上的应用[J]. 华东电力, 2006, 34(8): 43-46.  
YE Hongsheng, GONG Dawei, HUANG Weizhong. Technology of Increasing Current-Carrying Capacity of Overhead Conductors by Raising Their Allowable Temperature and Its Application to 500 kV Lines [J]. East China Electric Power, 2006, 34(8): 43-46.
- [3] 张云都, 易辉, 喻剑辉. 我国大截面与耐热导线输电技术的现状及展望[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 24-26.  
ZHANG Yundu, YI Hui, YU Jianhui. Present Situation and Prospect of the Big Sectional Wire and the Heat-Resistant Wire Electric Power Transmission Technology in China [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 24-26.
- [4] 彭向阳, 周华敏, 郑晓光, 等. 架空运行线路现场载流温升试验研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(6): 62-65.  
PENG Xiangyang, ZHOU Huamin, ZHENG Xiaoguang, et al. Locale Test Research on Current Carrying and Temperature-rise of Overhead Circulating Power Transmission Line[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(6): 62-65.
- [5] 彭向阳, 周华敏, 郑晓光. 架空线路在线监测系统建设及运行分析[J]. 电力建设, 2009, 30(9): 20-24.  
PENG Xiangyang, ZHOU Huamin, ZHENG Xiaoguang. Constructing of Online Monitoring System for Overhead Transmission Line and Analysis on Measure data [J]. Electric Power Construction, 2009, 30(9): 20-24.
- [6] 叶鸿声, 龚大卫, 魏顺炎, 等. 110-500 kV 架空送电线路设计技术规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [7] 彭向阳, 周华敏, 郑晓光, 等. 架空导线实验室载流温升试验研究[J]. 中国电机工程学报增刊, 2007, 27(s): 23-27.  
PENG Xiangyang, ZHOU Huamin, ZHENG Xiaoguang, et al. Experimental Study of Current Carrying and Temperature-rise of Overhead Conductors [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(s): 23-27.
- [8] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 180-200.
- [9] 彭向阳, 周华敏, 程启诚, 等. 提高现有输电线路输送容量研究[R]. 广州: 广东电力科学研究院, 2009.

收稿日期: 2009-03-27

作者简介:

彭向阳(1971),男,湖北人,高级工程师,硕士,主要从事输电线路及高压技术工作(e-mail) pigpxy@126.com;

周华敏(1965),男,江西人,高级工程师,主要从事输电线路、电网运行管理;

郑晓光(1966),男,广东人,高级工程师,硕士,从事电网运行管理。